UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO – PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA DEL AGUA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS
PROGRAMA DE ESTUDIOS: INGENIERÍA AGRÍCOLA

HIDRÁULICA FLUVIAL

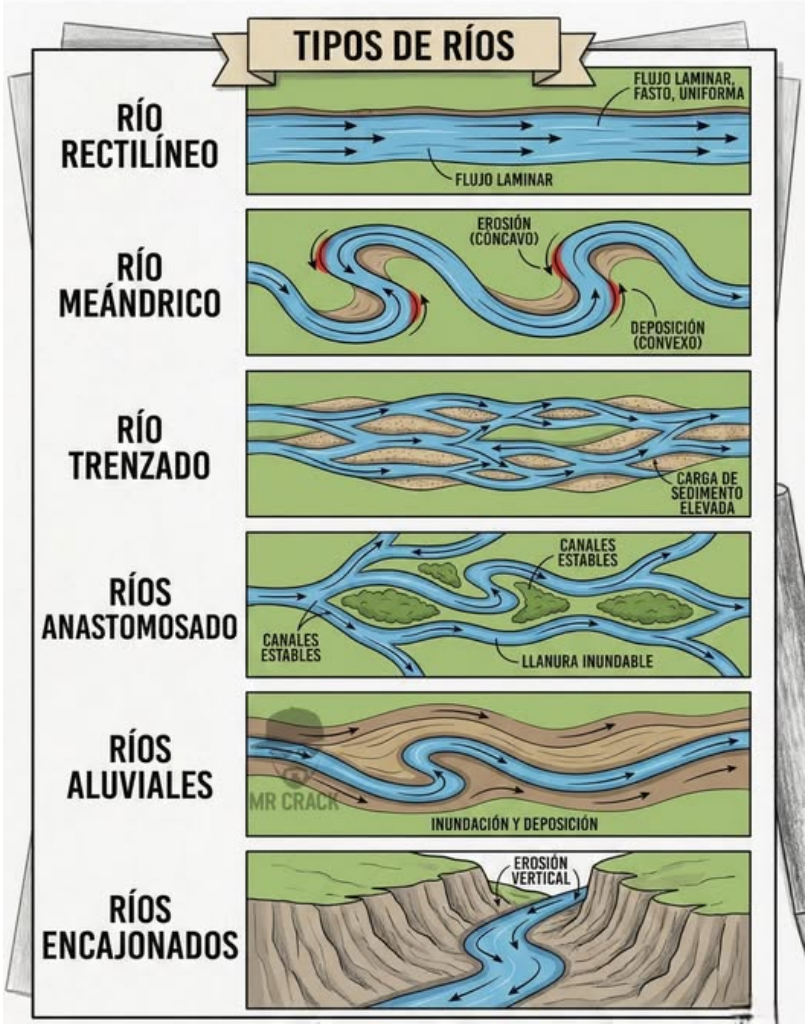
Conceptos de geomorfología fluvial. Clasificación

Semana 02

Docente: M. Sc. Angel Dario Canllahui Aquise

HIDRÁULICA FLUVIAL

2. Morfología de Ríos



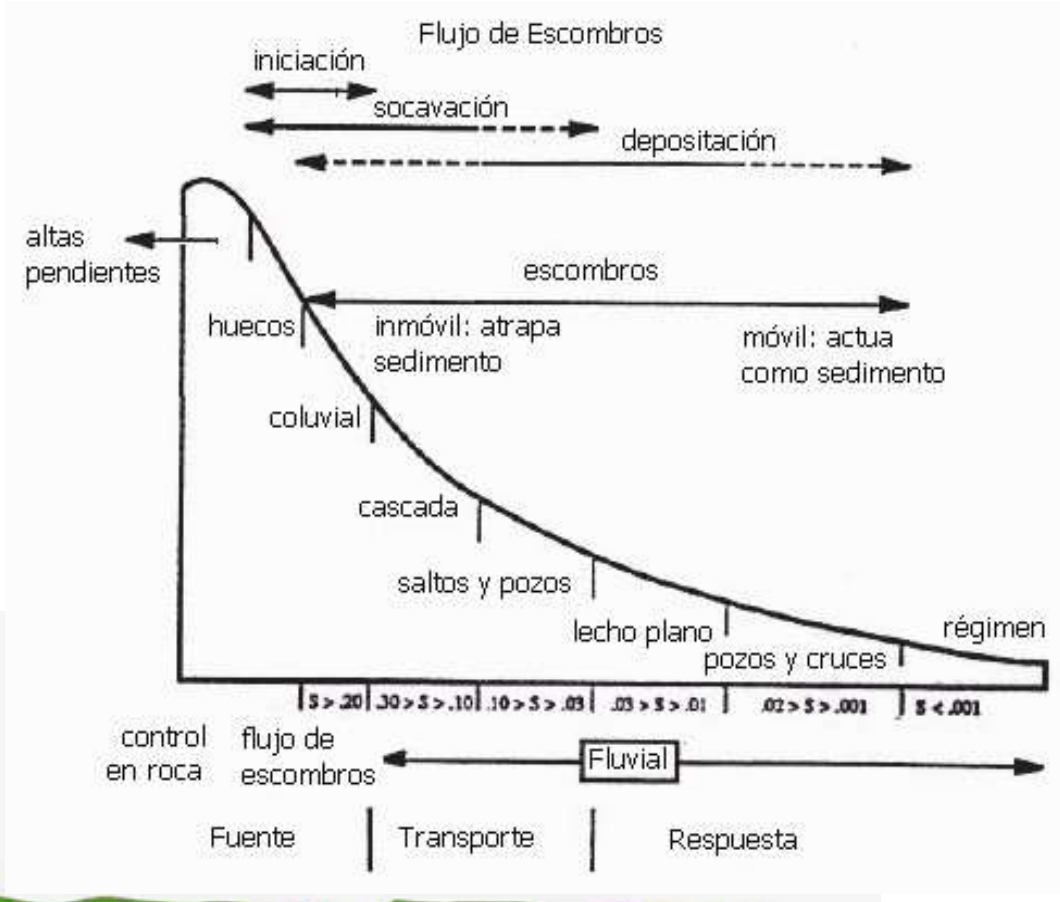
II. Morfología de ríos

La morfología de ríos estudia la estructura y forma de los ríos, incluyendo la configuración del cauce en planta, la geometría de las secciones transversales, la forma del fondo y las características del perfil.

Propósitos:

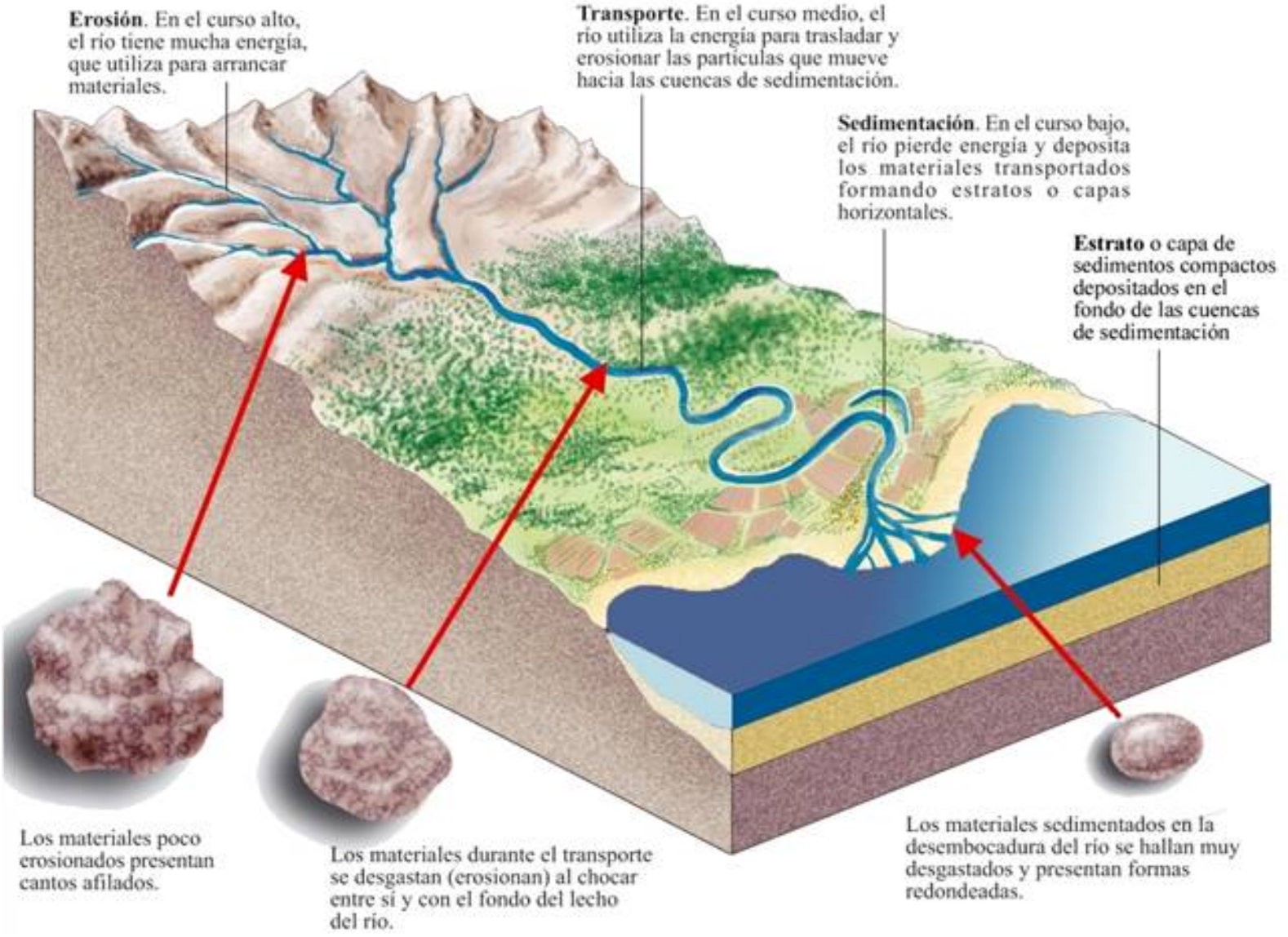
a. Conocer los conceptos básicos en el estudio de la forma de los ríos.
b. Identificar los diferentes tipos y factores que influyen en su morfología.
c. Conocer los ríos mendreantes y sus características geométricas.
d. Disponer de expresiones empíricas que permitan la obtención de parámetros de interés.
e. Comprender y aplicar las consideraciones para llevar a cabo un estudio de morfología de ríos.

Origen y comportamiento de los cauces naturales



Origen y comportamiento de los cauces naturales

Ejemplo de acción de un agente geológico externo: el río


Erosión. En el curso alto, el río tiene mucha energía, que utiliza para arrancar materiales.
Transporte. En el curso medio, el río utiliza la energía para trasladar y erosionar las partículas que mueve hacia las cuencas de sedimentación.
Sedimentación. En el curso bajo, el río pierde energía y deposita los materiales transportados formando estratos o capas horizontales.
Estrato o capa de sedimentos compactos depositados en el fondo de las cuencas de sedimentación
Los materiales poco erosionados presentan cantos afilados.
Los materiales durante el transporte se desgastan (erosionan) al chocar entre sí y con el fondo del lecho del río.
Los materiales sedimentados en la desembocadura del río se hallan muy desgastados y presentan formas redondeadas.

La morfología de ríos permite la predicción de cambios de forma en un río, esto es:

1. Conocer el comportamiento del río en el futuro para la protección de estructuras hidráulicas como la ubicación de un puente o una obra de toma.
2. Así también predecir el comportamiento del río en el caso de estructuras existentes o poblaciones.
3. Evaluar la respuesta de un río para diferentes métodos de protección de márgenes.
4. Evaluar la erosión de márgenes y el desarrollo del meandreo.
5. Estimar el ancho total ocupado por un río mendreante.
6. Evaluar los cambios aguas de una presa construida como son: cambio de pendiente, régimen del río y el meandreo aguas abajo.

2. Morfología de ríos

Tipos de ríos

Factores que influyen en una corriente para tomar una o u otra forma son:

1. Parámetros hidráulicos
2. Propiedades del fluidos
3. Características del flujo
4. Características del material del fondo (tamaño, graduación, forma, etc.).
5. Geometría y estructura de los bordos (altura, pendiente, cohesión, estratificación o tipo rocoso),
6. Características biológicas (tipo de vegetación: pasto, arbusto y arboles).
7. Factores humanos (agricultura, urbanización, drenaje, desarrollo de las llanuras de inundación y bordos de protección.

1. Parámetros hidráulicos

Los **parametros hidraulicos** son las . Son fundamentales para predecir si un río va a erosionar sus orillas o depositar sedimentos.

Aquí tienes los conceptos clave que componen este punto:

- **Caudal ($Q m^3/s$).** Se calcula como $Q = v \cdot A$.
- **Área Hidráulica (A**
- **Perímetro Mojado (P**
- **Radio Hidráulico (R):** Es la relación entre el área y el perímetro mojado ($R = A/P$). Indica qué tan "eficiente" es el cauce; a mayor radio, menor es la fricción relativa del agua con el fondo.
- **Velocidad Media (v):** Es el promedio de las velocidades del agua en toda la sección. No es uniforme: el agua suele ir más lento cerca del fondo y las paredes debido a la fricción.
- **Pendiente (S):** Es la inclinación o caída del espejo de agua (o del fondo del lecho) a lo largo del recorrido. Es el motor que da energía al movimiento del agua.

2. Propiedades de los fluidos

Aunque el fluido es agua, factores como la **densidad** , la **viscosidad** y la temperatura influyen en cómo se mueve. Por ejemplo, el agua más fría o con mayor carga de sedimentos cambia su viscosidad, afectando su capacidad de transporte.

3. Características del flujo

Describe el comportamiento del movimiento del agua. Puede ser **laminar** (suave) o **turbulento** (caótico), y **subcrítico** (lento) o **supercrítico** (rápido). La turbulencia es el principal motor de la erosión y el transporte de sedimentos.

4. Características del material del fondo

Se refiere a qué está hecho el "piso" del río. El **tamaño** (gravas, arenas, limos), la **forma** de las piedras y su **graduación** (mezcla de tamaños) determinan qué tan fácil es para la corriente arrastrar ese material y cambiar la forma del fondo.

5. Geometría y estructura de los bordos

Es el diseño y composición de las paredes o riberas. La **cohesión** (qué tan "pegada" está la tierra) y si hay rocas o capas (estratificación) definen si el río se ensanchará fácilmente o si mantendrá un canal estrecho y profundo.

6. Características biológicas

La **vegetación riparia** (pasto, arbustos y árboles) actúa como un pegamento natural. Las raíces estabilizan las orillas, evitando que el río se desborde o cambie de curso bruscamente, y las plantas en el borde frenan la velocidad del agua.

7. Factores humanos (Antrópicos)

Son las alteraciones hechas por nosotros. La **urbanización** aumenta el escurrimiento, las **presas** cortan el paso de sedimentos y la **agricultura** puede debilitar las orillas. Esto suele forzar al río a buscar un nuevo equilibrio de forma artificial.

En la naturaleza se presentan diferentes formas de ríos, siguientes:

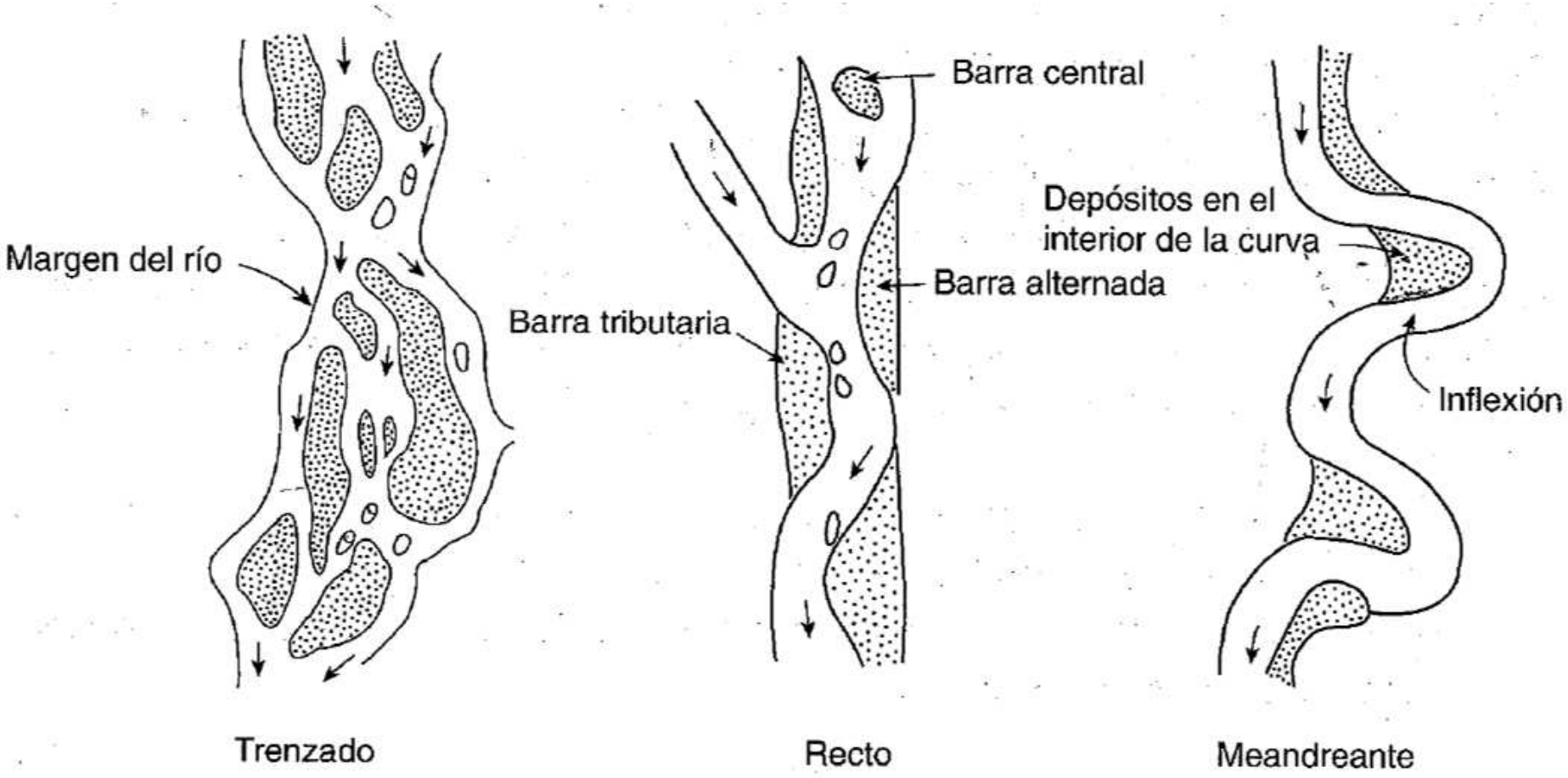


Figura 2.1 Tipos de ríos de acuerdo con su geometría: trenzado, recto, meandreante, Simons y Julien, 1984.

A continuación con mas detalle.

Clasificación de ríos de acuerdo a su geometría

Ríos rectos:

a. Alineación recta.
b. Presente en planicies, bajas velocidades erosivas y en pendientes fuertes alcanzan velocidades altas.
c. La alineación recta es posible por la alta concentración de sedimento asociada a una pendiente fuerte, aunque esto no es una condición determinante.
d. En general un cauce con gasto fluctuante tiende a formar un cauce trenzado.

Ríos trenzados

Son aquellos formados por canales interconectados aleatoriamente, separados por barras que presentan la apariencia de una trenza.

a. La pendiente generalmente es baja y o en su caso puede ser con pendiente fuerte, esto es:

Ríos trenzados

$S = 0.0208\, Qma^{1/4}$ Lane (1957).

$S = 0.0125\, Qma^{0.44}$ Leopold y Wolman (1957)

Qma gasto medio anual en m^3/s, ec. Lane.

Qma gasto medio anual, ec. Leopold

S pendiente en m/m

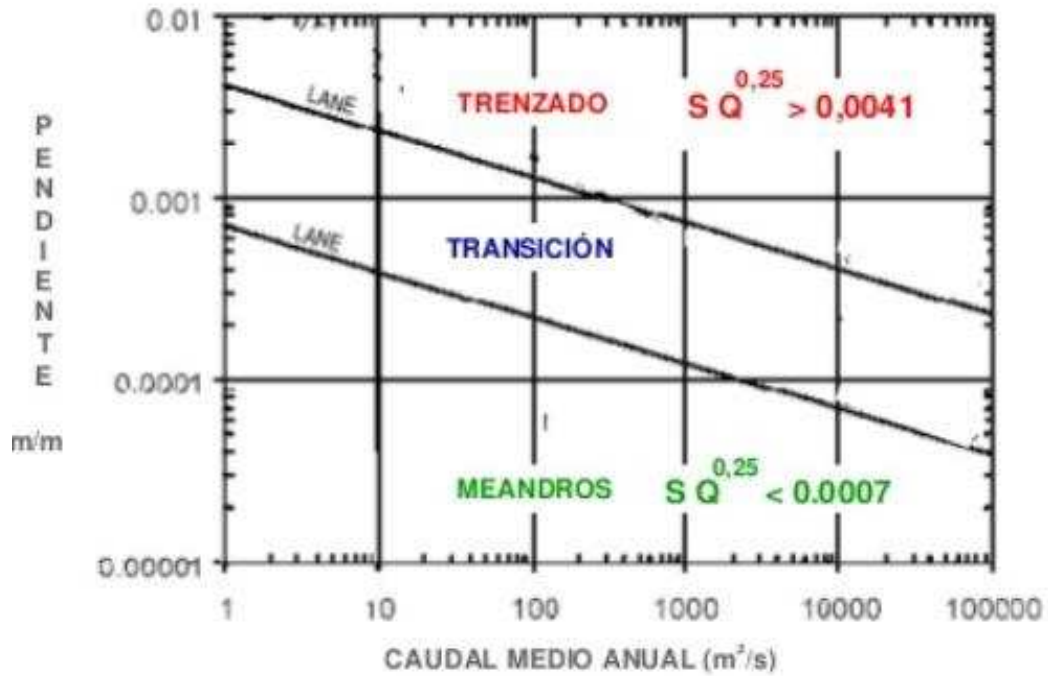
b. La formación de ríos trenzados, se debe a la **formación de barras por depósito de sedimentos** asociados a diferentes pendientes.
c. También el trenzado del río puede deberse al depósito de sedimentos durante avenidas grandes que acarrean material, dando origen a las barras o islas donde florece la vegetación.

Ríos con meandros

Un río con meandro (sinuoso) es aquel en el que la geometría se presenta en forma de curvas consecutivas. Las formas y tamaños de los meandros se debe al origen y evolución durante el tiempo que están asociadas al material de las márgenes.

Clasificación de ríos de acuerdo a su geometría

Forma práctica, si un cauce arenoso es trenzado o mendreante (sinuoso) conforme Lane.



Interpretación y Uso:

Para determinar el patrón de un río, se localiza el punto en el gráfico que corresponde a su pendiente y caudal medio anual. La región en la que cae ese punto indica el tipo de patrón de canal esperado.

- Si un río tiene una pendiente de 0.001 m/m y un caudal de 100 m^3/s, por ejemplo, se ubicaría en la región de "TRANSICIÓN".
- Si otro río tiene una pendiente de 0.0001 m/m y un caudal de 10 m^3/s, caería en la región de "MEANDROS".
- Si un río tiene una pendiente de 0.005 m/m y un caudal de 5000 m^3/s, se encontraría en la región de "TRENZADO".

Este gráfico es una herramienta valiosa para ingenieros hidráulicos y geomorfólogos para entender y predecir el comportamiento de los ríos.

Para resolver esto, necesitamos calcular el valor de $S \times Q^{0.25}$ y compararlo con los umbrales dados en el gráfico.

Datos:

- Pendiente (S) = 0.001 m/m
- Caudal (Q) = 100 m³/s

Fórmula a utilizar:

Queremos evaluar la expresión $S \times Q^{0.25}$.

Cálculo:

1. **Calcular $Q^{0.25}$:**

$$100^{0.25} = (10^2)^{1/4} = 10^{2/4} = 10^{1/2} = \sqrt{10} \approx 3.162$$

2. **Calcular $S \times Q^{0.25}$:**

$$0.001 \times 3.162 = 0.003162$$

Comparación con los umbrales:

- El umbral para **MEANDROS** es $SQ^{0.25} < 0.0007$.
- El umbral para **TRENZADO** es $SQ^{0.25} > 0.0041$.

Nuestro valor calculado es 0.003162.

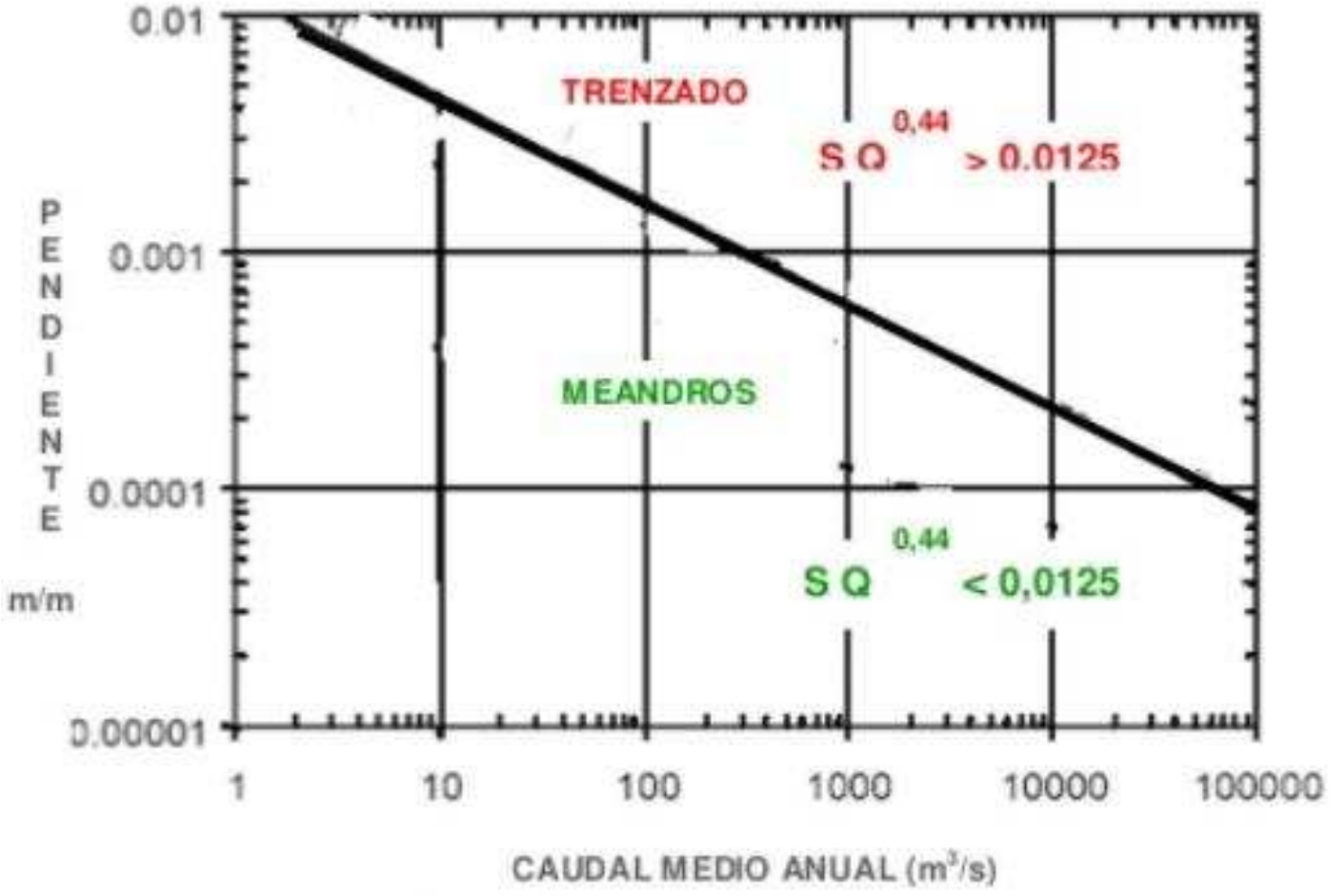
- ¿Es $0.003162 < 0.0007$? No.
- ¿Es $0.003162 > 0.0041$? No.

Conclusión:

Dado que $0.0007 < 0.003162 < 0.0041$, el valor calculado de $S \times Q^{0.25}$ cae en la **región de transición**.

Por lo tanto, un río con una pendiente de 0.001 m/m y un caudal de 100 m³/s se encontraría en una **zona de transición** según el Criterio de Lane.

Forma practica de determinar, si un cauce es trenzado o mendreante (sinuoso) conforme Leopold y Wolman**, ríos de arena y grava.**



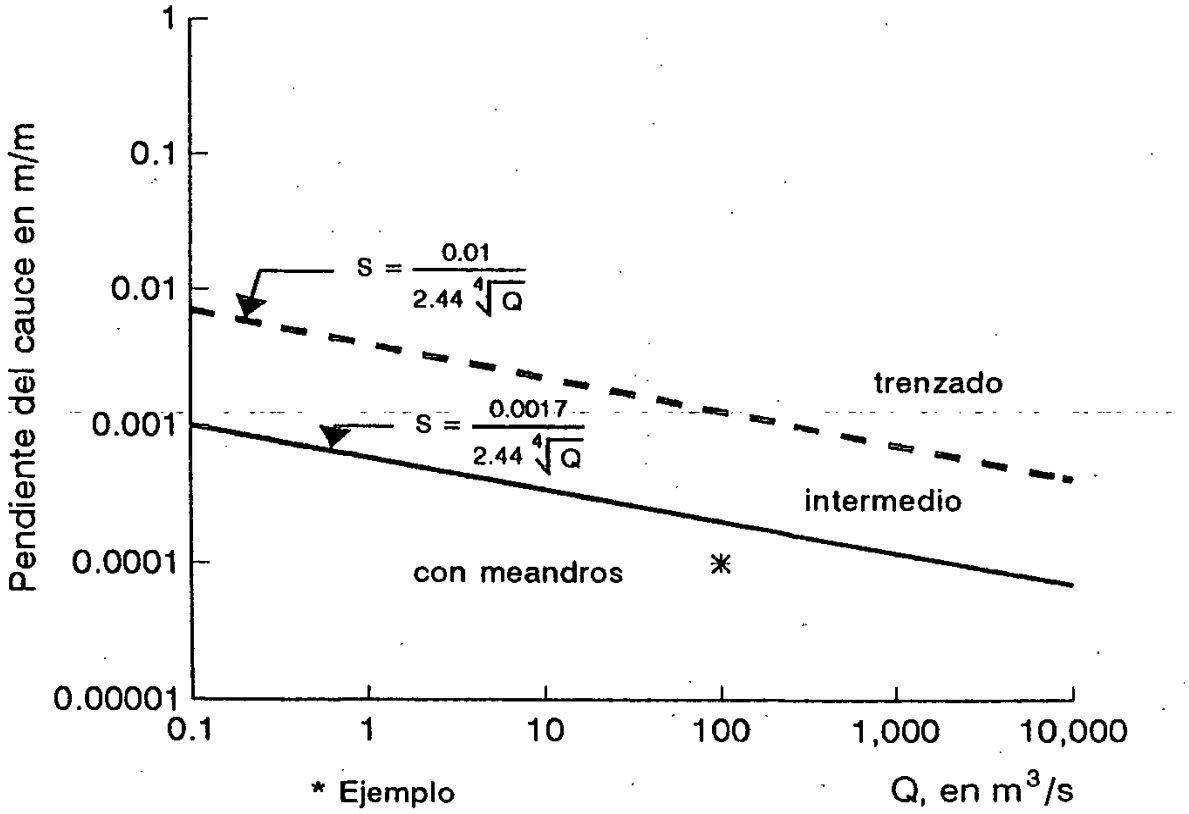


Fig. 11.4 Relación entre el gasto medio anual y la pendiente

¿Por qué es útil?

Si estás diseñando un canal o analizando un río y tus datos caen cerca de la línea superior, debes tener cuidado: el río intentará ensancharse y crear islas de arena, lo que puede destruir obras civiles o puentes si no se protegen las márgenes.

¿Tienes los datos de **pendiente** y **caudal** de tu proyecto para ubicarlos en esta gráfica?

Ejemplo 1.

Un cauce de fondo arenoso tiene una pendiente media de 0.0001 m/m, se determinó el gasto medio anual de 150 m3/s, determine con los criterios de Lane y Leopold y Wolman, el tipo de rio si es trenzado o mendreante.

Solución:

a. Conforme a la **grafica de Lane**, con el valor de S=0.0001 m/m y Qma de 150 m3/s, el rio es mendreante (sinuoso).

b. En la grafica de **Leopold y Wolman**, para los datos el rio es mendreante (sinuoso).

Conclusión:

Se determina que con esta pendiente el cauce seguirá siendo mendreante o sinuoso.

Ejemplo 2.

Una corriente tiene una pendiente de 0.0002 m/m, y se calcula que el gasto medio anual aumentará de 150 a 200 m3/s se desea saber si existe la posibilidad que pudiera cambiar convertirse en un río trenzado. Utilice el criterio de Lane y de Leopold y Wolman.

Solución:

a. Conforme a la **grafica de Lane**, con el valor de S=0.0002 m/m y Qma de 200 m3/s, el rio es mendreante (sinuoso).

b. En la grafica de **Leopold y Wolman**, para los datos el rio es mendreante (sinuoso).

Conclusión:

El rio continuara siendo mendreante o sinuoso, ya que es imposible que con esta pendiente cambia a un rio trenzado.

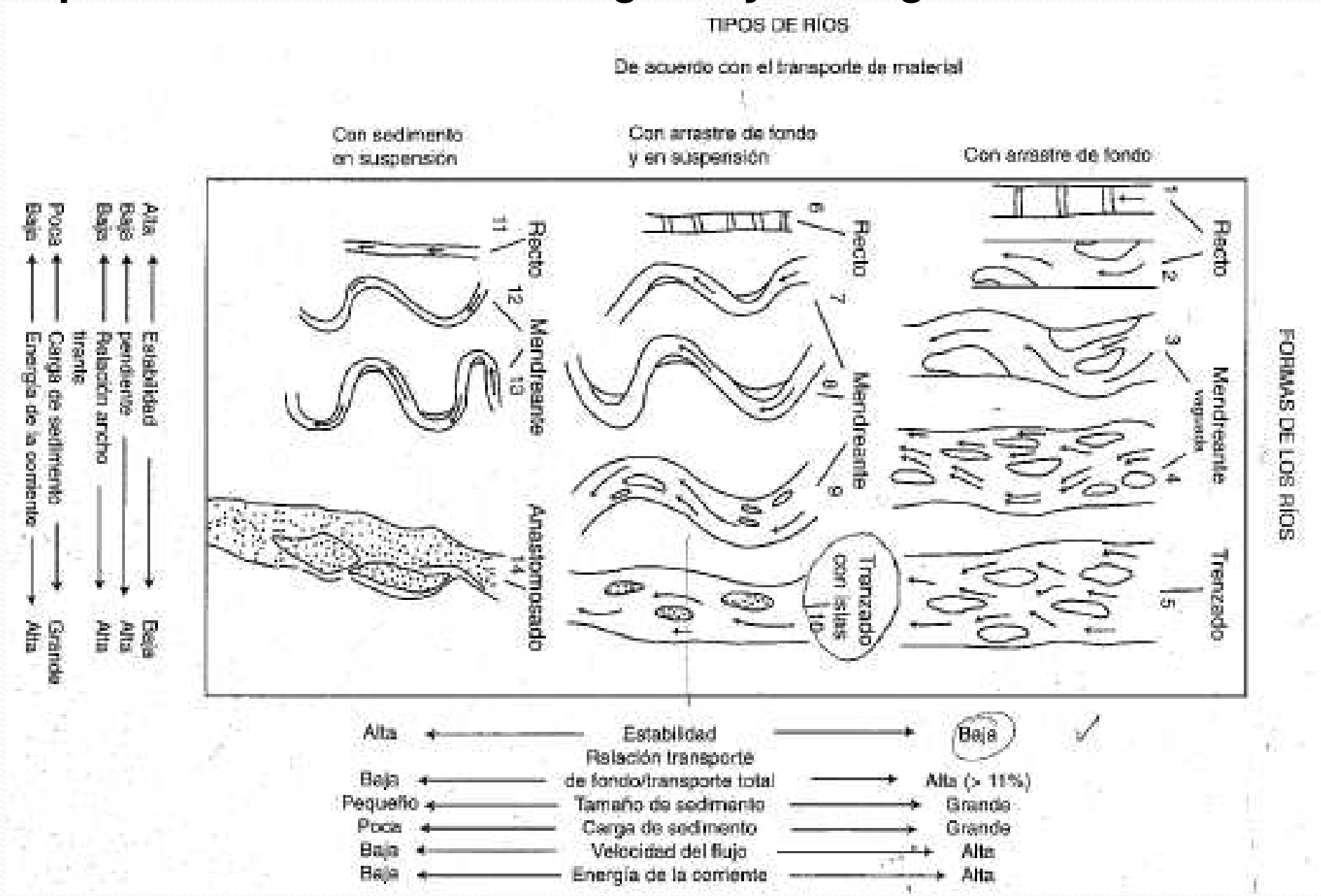
Ejercicio Propuestos:

Los ríos que a continuación se mencionan son de fondo arenoso, considere una pendiente media de 0.00085 m/m para cada uno. Determine para cada estación hidrométrica el gasto medio anual (m3/s) en los ríos siguientes:

1. Rio Grijalva, Estación hidrométrica Gaviotas.
2. Río Samaria, estación hidrométrica Samaria.
3. Río Carrizal, estación hidrométrica González.

Aplique los criterios de Lane y Leopold y Wolman, en cada rio, si es trenzado o mendreante (sinuoso) , verifique los resultados con las ecuaciones o graficas. En un anexo en Excel entregue como determino el gasto medio anual en cada estación hidrométrica.

Tipos de ríos de acuerdo al gasto y la carga de sedimentos



Análisis del gasto liquido y solido en la formación de ríos.

a. Cuando un río transporta una carga de sedimentos en exceso causa depósito y el caso contrario causa erosión y en los extremos está el cauce estable.
b. Un cauce es estable, si no muestra un cambio progresivo en la pendiente, dimensiones y forma.
c. En un cauce estable pueden ocurrir cambios temporales durante las avenidas, pero al paso del tiempo ajusta su pendiente a la descarga y conserva la velocidad requerida para transportar la carga de sedimentos aportada.
d. Los cambios de régimen hidrológico en un cauce, como el gasto y tipo de carga de sedimento, conllevan ajustes morfológicos como son: ancho del cauce, tirante, sinuosidad y longitud de onda del meandro.

2.3 Ríos mendreantes (sinuosos)

En la práctica un meandro consiste es un par de curvas opuestas, que son de diferente forma, inicialmente como un arco casi simétrico que puede desarrollarse en una variedad de formas simétricas, no simétricas o de sección compuesta, ejemplo:

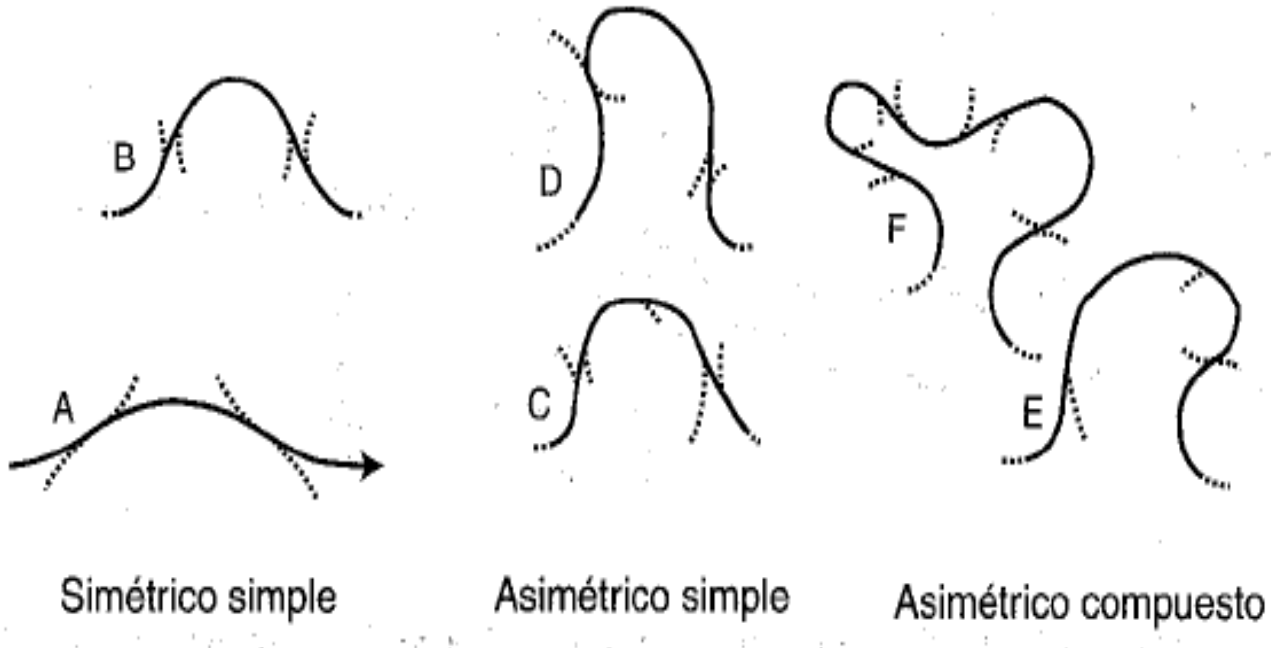


Figura 2.4 Representación esquemática de los tipos de curvas que se desarrollan en un río meandreante, Brice, 1984.

En general la pendiente de un **río con meandro** son relativamente bajas en comparación con las pendientes de los ríos **rectos trenzados**, por tal razón las pendientes suaves están relacionadas con velocidades bajas y números de Froude pequeños.

Geometría de meandros

Las características que definen la geometría de los ríos meandreantes, es:

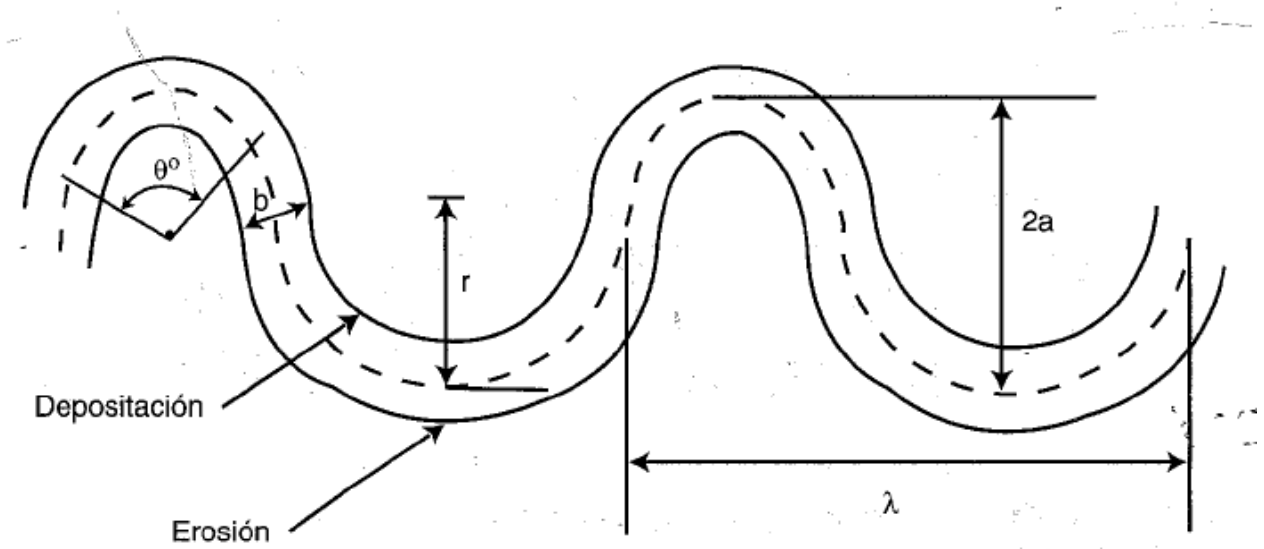


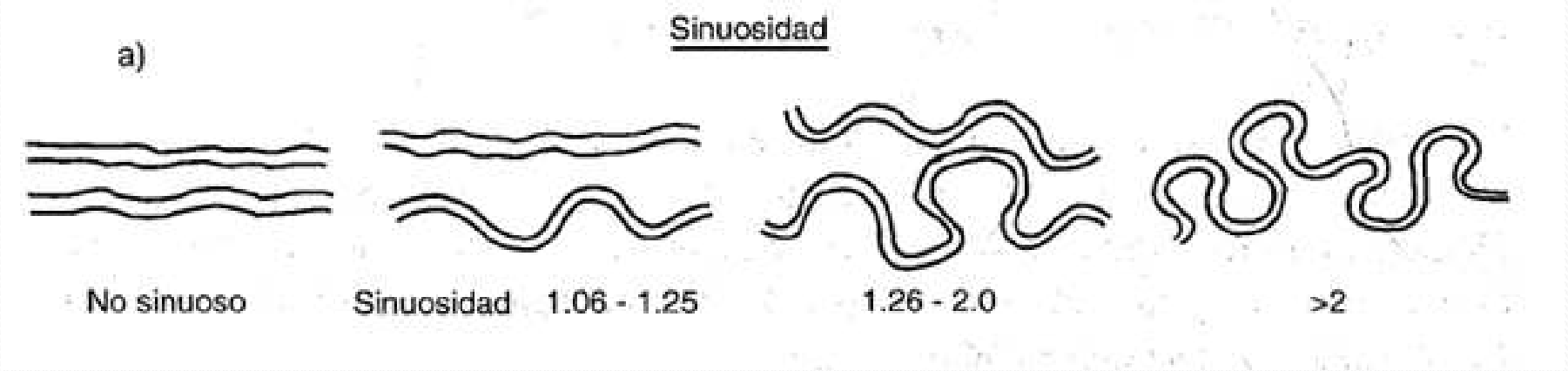
Figura 2.5 Geometría de un meandro.

Dónde:

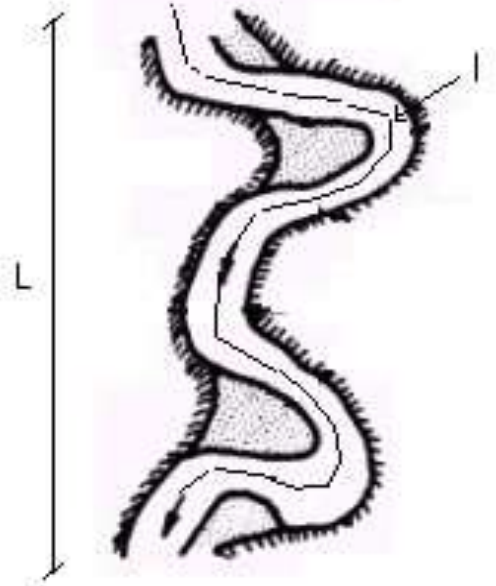
- λ longitud de onda del meandro
- a amplitud
- r radio de curvatura
- B ancho de meandro
- b ancho del río.

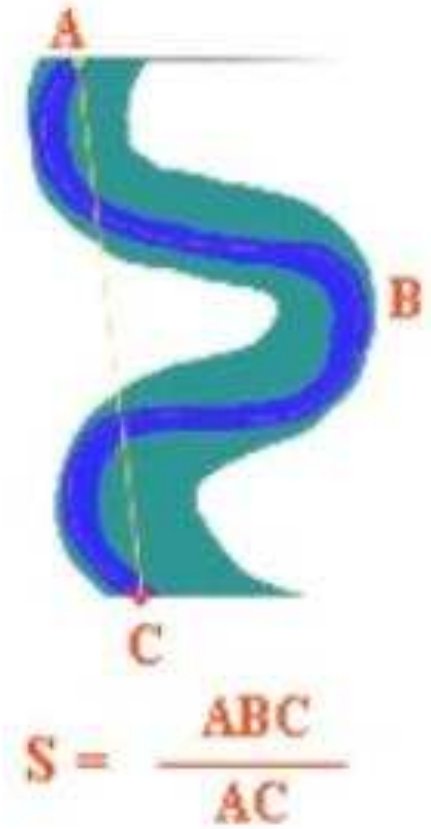
Resumen de un meandro:

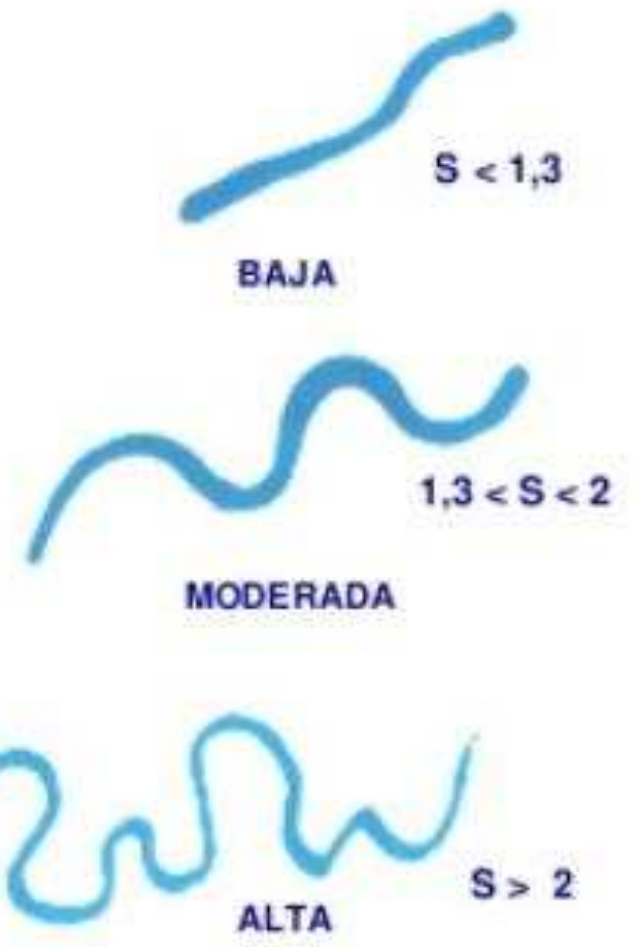
1. Por lo general el río se divide en **meandros individuales** considerados a partir del punto de inflexión, por lo cual sus características se promedian.
2. La sinuosidad es la relación entre la **longitud del río** y la **longitud del valle**.
3. En general los meandros son de diferentes formas y tamaños, ejemplo:



Determinación de la sinuosidad y tortuosidad de un río.







Sinuosidad= $\frac{\text{Long. Thalweg}}{\text{Long. Valle}}$ Tortuosidad $= \left[\frac{\text{Long. Thalweg} - \text{Long. Valle}}{\text{Long. Valle}}\right] * 100$

Ondulacion / Onda

Ejercicio Propuestos:

Determine los valores de la **sinuosidad y tortuosidad** para tres ríos de la planicie tabasqueña:

1. Localice un rio a través de Google earth Pro, ubique el meandro en coordenadas geográficas y UTM.
2. Obtenga en AutoCAD los parámetros del meandro.
3. Determine los valores sinuosidad y tortuosidad de cada río.
4. Anexe un informe de la metodología y los cálculos realizados.
5. Entregue en CD el archivo del trabajo desarrollado, incluye caratula del CD.

Corte de un meandro o estrangulamiento

La forma de las márgenes de un río cambia continuamente mientras el río migra, esto es:

1. Los cortes de meandros ocurren cuando una de las curvas se cierra como consecuencia constante de la expansión y traslación de los meandros.
2. En otros casos el corte de un meandro ocurre generalmente en las avenidas se forman tramos de flujo rápido (rompidos) que el río abandona el tramo curvo y establece su flujo a través de un cauce comparativamente más recto y corto (Joglekar, 1971)
3. El corte de un meandro ocurre generalmente durante una avenida, y depende de los parámetros como son: radio curvatura del cauce, rugosidad, vegetación, capacidad de erosión de la planicie de inundación, geometría del tramo de río y magnitud y duración de las avenidas.

Corte de un meandro o estrangulamiento

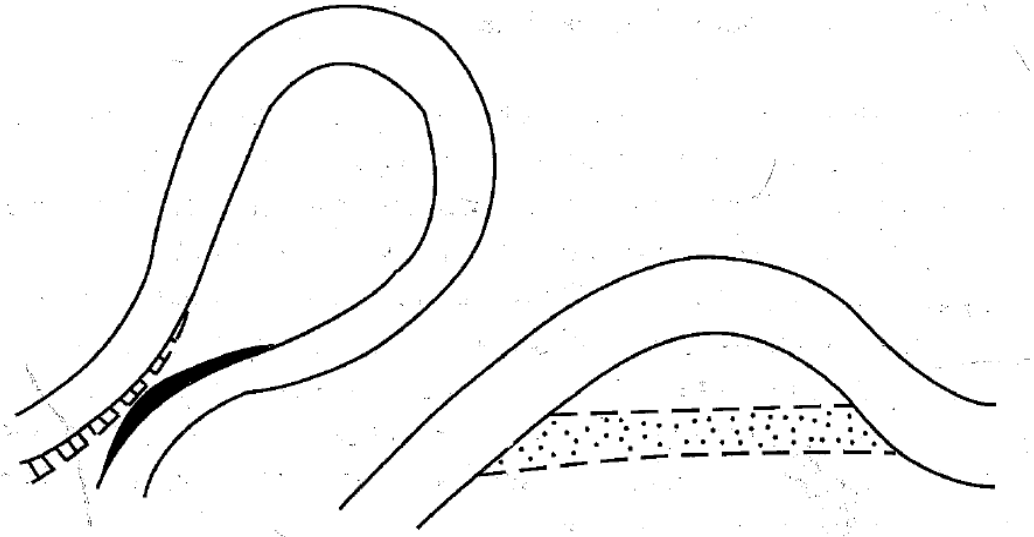
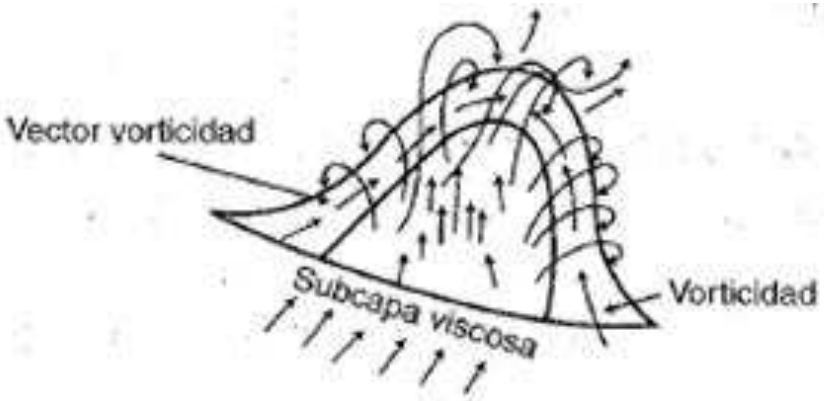


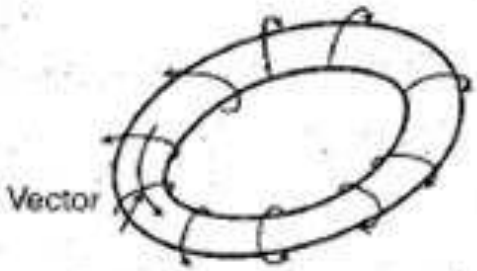
Figura 2.10 Formas más comunes de estrangulamiento o corte de meandros, Brice, 1984.

2.3 Causas del meandreo

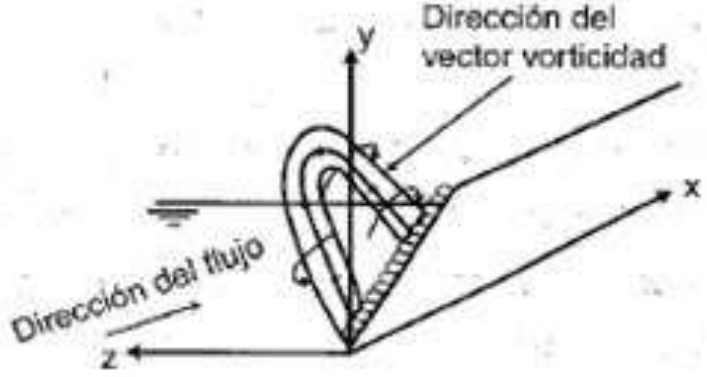
- Existen varias explicaciones para el meandreo en ríos: **La rotación de la tierra, estabilidad de circulación de flujo secundario y la teoría de mínima variancia de (Einstein y Shen, 1964).**
- Los investigadores (Einstein y Shen, 1964) supusieron que el primer tipo de barras alternadas diagonalmente resulta de ondas de agua superficiales y el segundo tipo de patrones en forma de hoyos debido a las diferencias entre los esfuerzos cortantes de las dos márgenes en una sección del río.
- ***Por lo tanto la formación de meandros se debe a las corrientes secundarias generadas por la vorticidad que provee transferencia de cantidad de movimiento y disipación de calor por medio de estructuras en forma de herradura o de anillos vorticosos de gran tamaño (figura 2.12 a y b).***



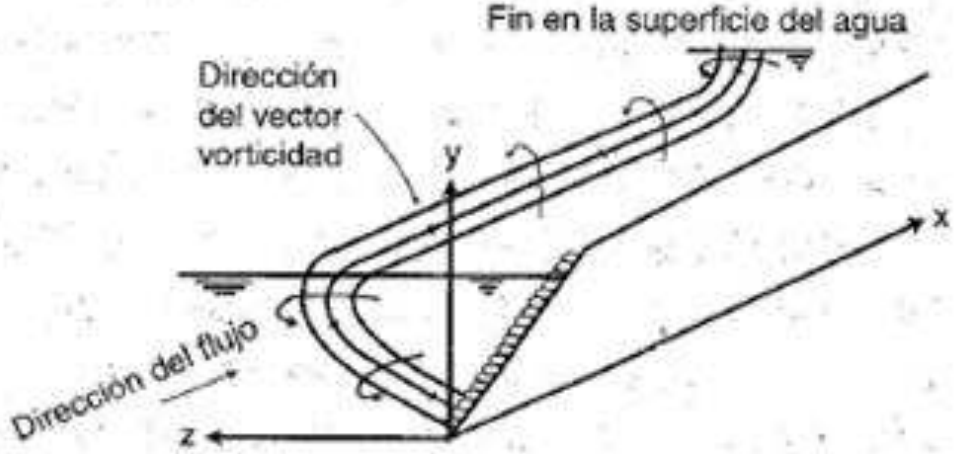
a) Vórtice de herradura en la pared



b) Vórtice anular



c) Vórtice tipo herradura en una pared rugosa



d) Brazo del vórtice de herradura que termina en la superficie libre del agua

Parker describe el proceso de evolución de la morfología de un río:

1. El meandreo y trenzado ocurren para relaciones de ancho-tirante grandes.
2. Los patrones de curvas y barras aparecen cuando en un río hay pequeñas avenidas y se deben a barras existentes en el fondo de un río inicialmente recto.
3. Las barras alternadas ocurren en cualquier tipo de ríos, aun en los que tienen paredes y fondo no erosionables.
4. El meandreo y el trenzado resultan del mismo tipo de inestabilidad en diferentes grados. Los factores esenciales para la inestabilidad son el transporte de sedimentos y la fricción.

Parker, identifica el meandreo y trenzado de la manera siguiente:

El meandreo ocurre en el río si: $S/F << d/b$

El tranzado ocurre en el río si: $S/F >> d/b$

2.5 Fórmulas empíricas

Correlaciones estadísticas que dan como resultado fórmulas que relacionan **gastos y pendientes típicas en cauces:**

$$\lambda = c_1 B^{c2}$$

$$\lambda = c_3 B^{c4}$$

$$a = k_1 \, b^{k2}$$

Dónde:
Q gasto en m^3/s,
c_1, c_2, c_3, c_4, k_1, k_2 son constantes.

Cuadro 2.1 Fórmulas empíricas entre longitud de onda (λ) y ancho (b). S.I. de unidades.

Ecuación	Autor
$\lambda = 6.60\ b^{0.90}$	Inglis, 1949 (datos de Ferguson)
$\lambda = 10.90\ b^{1.01}$	Leopold y Wolman, 1960
$\lambda = 10.00\ b^{1.005}$	Zeller, 1967
$\lambda = 12.13\ b^{1.09}$	Ackers y Charlton, 1970
$\lambda = 17.20\ b$	Goryeki, 1960

Cuadro 2.2 Fórmulas empíricas entre amplitud (a) y ancho (b). S.I. de unidades.

Ecuación	Autor
$a = 18.9\ b^{0.99}$	Inglis, 1949 (datos de Ferguson)
$a = 10.9\ b^{1.04}$	Inglis, 1949 (datos de Bates)
$a = 2.7\ b^{1.1}$	Leopold y Wolman, 1957
$a = 4.5\ b$	Zeller,1967
$a = 14.0\ b$	Bates, 1944
$a = 18\text{-}20\ b$	Dury, 1954
$a = 12.15\ b$	Altunin, 1949

Cuadro 2.3 Relaciones empíricas entre longitud de onda (λ) y descarga (Q). S.I. de unidades.

Ecuación	Autor
$\lambda = 54.0\ Q^{0.5}$	Inglis, 1949
$\lambda = 32.9\ Q^{0.55}$	Leopold y Wolman, 1957
$\lambda = 54.3\ Q^{0.5}$	Dury, 1956
$\lambda = 11.55\ Q^{0.76}$	Agarwal, 1941
$\lambda = 61.2\ Q^{0.47}$	Blench, 1910

Cuadro 2.4 Fórmulas empíricas de diferentes autores presentadas por Hayashi (1970).

Fórmula	Autor
$\lambda = K1\ Q^{n1}$ $n1 = 0.34\ 0.67$	Inglis, Dury, Schumm, Ackers y Charlton, Ferguson
$\lambda = K2\ b^{n2}$ $n2 = 0.98\ 1.27$	Inglis, Leopold y Wolman, Speight, Yalin, JSCE Task Committee, Ferguson
$\lambda = K3\ d(Q^2/gd^5)^{n3}$ $n3 = 0.186\ 0.279$	Charlton y Benson, Masuda, Ackers y Charlton.
$K1$, $K2$, $K3$ = constantes empíricas, d = diámetro del sedimento, Q = gasto típico	

Erosión y depositación

a. Erosión

El proceso de mover el sedimento de su fuente inicial o reposo se denomina erosión.

En general el agua erosiona el material de las márgenes y fondo y los transportes conforme a la energía de la corriente.

Erosión de suelos ➡ transporte de sedimentos ➡ depositación (sedimentación)

La erosión del suelo y el sedimento resultante en la cuenca (km^2/año), depende del **clima, lluvia, tipo de suelo, pendiente del suelo y vegetación**. No existen fórmulas universales para estimar la erosión, sino que se desarrollan formulas empíricas.

b. Depositación (Sedimentación)

La depositación ocurre debido a procesos geológicos (con escala de tiempo de cientos de años; desplazamiento de márgenes en ríos (escala de tiempo de décadas) y por la reducción del transporte local (efecto de corta duración).

El proceso de sedimentación se debe en diferentes tramos donde flujo decrece.

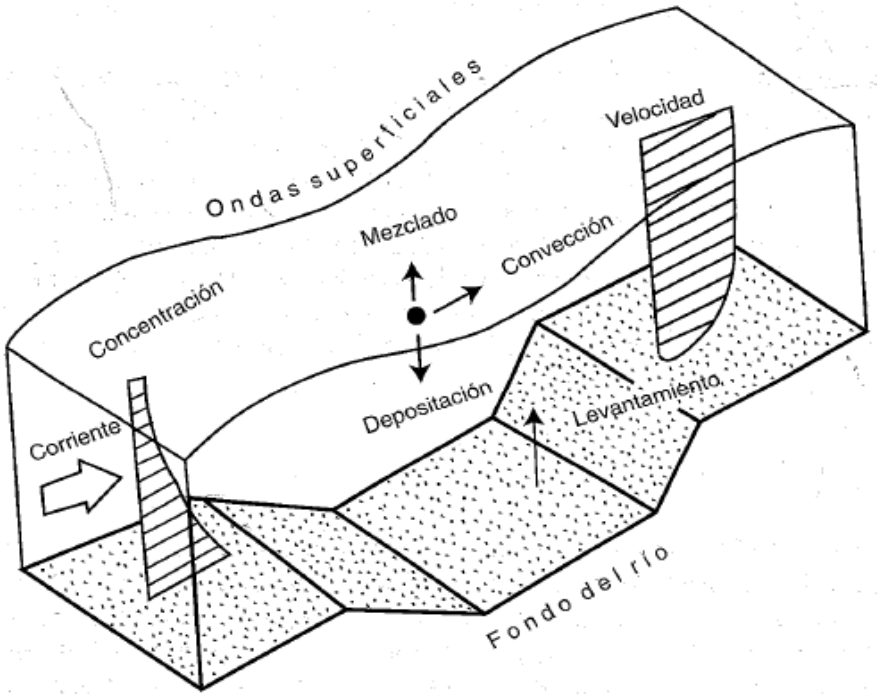


Figura 2.14 Los procesos en el transporte de sedimentos en canales, Van Rijn, 1993.

Estudio de Morfología en ríos

Datos mas importantes en un estudio de morfología de un río:

1. Registro histórico de gastos.
2. Nivel de la superficie libre del agua.
3. Planos del río en planta y en perfil en secuencia de tiempo.
4. Perfil de secciones transversales.
5. Fotografías áreas que permitan determinar zonas de erosión y depósito de sedimentos.
6. Registro histórico de sedimentos en el río
7. Muestreo del material del fondo y márgenes, etc.

Resultados con los datos anteriores son para los estudios de **hidrología, morfología y procesos sedimentarios** y además estudiar la variación temporal y espacial de los diferentes procesos que están relacionados con los cambios morfológicos del río.

Datos para el estudio de Morfología en ríos:

8. Además se debe considerar dos factores que controlan la erosión de las márgenes y su migración como son los esfuerzos cortantes que actúan en las márgenes y la resistencia a la erosión de los sedimentos.
9. En campo se debe realizar mediciones de perfil de velocidades para determinar los esfuerzos cortantes.
10. Las mediciones del perfil de velocidades se realiza en diferentes secciones donde exista cambio de dirección del flujo.
11. Se puede suponer que el perfil de velocidades es logarítmico en cada vertical para estimar el esfuerzo cortante en el fondo.

Evaluación en clase:

1. ¿Cuáles son los criterios para clasificar los ríos?
2. ¿Cuáles son los factores que tienen mayor influencia en el cambio de forma de un río?
3. ¿Los cuales son los tipos de ríos meandrentes?
4. Es posible que un río presente cambios en su morfología en ciertos tramos?¿Porque?
5. Como están relacionados los procesos de erosión y deposito con al migración de los ríos?
6. ¿Cuándo es importante realizar un estudio de la morfología de un río?

Bibliografía:

- Morfología de ríos, Capitulo 2, **"Protección y Control de cauces, IMTA**, Pagina 25-53.
- Manual de Ingeniería de Ríos, **Capítulo 11, Morfología de ríos, UNAM,** Pagina 1-39.